

煤矿水害防治关键技术与应用研究

瞿金龙

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年8月25日; 录用日期: 2025年10月1日; 发布日期: 2025年11月20日

摘 要

煤矿水害是影响国家安全发展的重要因素, 其治理方法的革新和推广, 将对矿山持续稳定、工人人身财产的保障起到至关重要的作用。本研究对矿井突水的基本形式和致灾机制进行了深入剖析, 对矿井水害防治的主要控制方法进行了系统性论述, 并以典型实例对其实施效果进行检验。研究成果为矿井水害防治提供了新的思路和方法。以华北型煤田奥灰水、西北地区砂岩水、南方岩溶水及老空区含水层4种主要水灾害为研究对象, 验证了防治方法的有效性与实用性, 为国家开展矿井水害综合防控工作奠定了理论基础。

关键词

煤矿水害, 防治技术, 探测监测, 预测评价, 工程措施, 应急抢险

Research on Key Technology and Application of Coal Mine Water Hazard Prevention

Jinlong Qu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: August 25, 2025; accepted: October 1, 2025; published: November 20, 2025

Abstract

Coal mining water hazards constitute a critical factor affecting national security and development. Innovations and promotion of management methods will play a vital role in ensuring sustainable mine operations and protecting workers' lives and property. This study provides an in-depth analysis of the fundamental forms and disaster mechanisms of mine water outbursts, systematically discusses primary prevention and control strategies, and validates their effectiveness through case

文章引用: 瞿金龙. 煤矿水害防治关键技术与应用研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1467-1475.

DOI: 10.12677/me.2025.136162

studies. The research outcomes offer new approaches and methodologies for comprehensive mine water hazard management. Focusing on four major types of water hazards—O graywater in North China coalfields, sandstone water in Northwest China, karst water in southern regions, and aquifers in abandoned mine areas—the study demonstrates the practicality and effectiveness of prevention methods. These findings establish a theoretical foundation for implementing integrated water hazard control measures nationwide.

Keywords

Coal Mine Water Hazard, Prevention and Control Technology, Detection and Monitoring, Prediction and Evaluation, Engineering Measures, Emergency Rescue

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

矿井突水灾害的防控一直是矿井安全工作中的重要问题，其成因在于复杂的地质结构、水文条件和采矿扰动等因素。现代矿井水害治理的发展趋势是从传统的经验判断走向科学预测，由单一措施走向系统工程，由被动反应走向积极预防。近年来，随着地球物理勘探技术的不断发展，对隐蔽型含水层结构的精确识别已可达米量级乃至亚米量级，先进的数值模拟方法为矿井突水危险性评价提供了量化手段，智能化监控系统的普及为矿井突水危险性的实时、动态感知奠定了基础[1]-[3]。

目前，国内外水害防控的前沿理念是以预防为主、综合治理、动态控制的思路，构建覆盖勘察、设计、施工、运行等全生命过程的防灾减灾管理体系，最大限度降低灾害发生率和危害程度[4]-[6]。本研究将对矿井突水灾害防控中的核心技术进行系统性梳理，并对其实施效果进行深度分析，以促进矿井突水灾害防控技术的不断创新与推广。

2. 煤矿水害类型及形成机理

2.1. 主要水害类型分类

基于水源属性、赋存状态及危害等级，构建了涵盖地表水 - 地下水 - 人造水三个层次的分类体系[7][8]。

地表水害包括河流洪水、湖泊溃决和水库垮坝等，具有水量巨大、来势迅猛但发生地点相对固定的特征。

浅部地下水害主要表现为松散层孔隙水，在我国东部平原地区煤矿较为常见，含水层厚度 100~300 m，涌水强度 5~50 m³/h，水质以微咸水为主，具有强腐蚀性。

深部地下水害中，华北奥陶系灰岩裂隙型岩溶水是最严重的类型之一，赋存深度 200~400 m，水压 2~6 MPa，单孔涌水量可超过 1000 m³/h，是重大突水灾害的主要来源。南方岩溶水具有极强的不均匀性，大型岩溶管道系统可产生数千立方米每小时的地下水流，而小型岩溶洞穴渗透能力相对较弱，在溶蚀演化过程中不断变化。

人工水害主要指老空区积水，其规模与积水时间、汇水面积及补给条件有关，由于长期封闭，水质多呈酸性，对巷道支护及设备具有强腐蚀性。

2.2. 水害形成的地质条件

矿井突水灾害的形成机理是构造地质学、水文地质学、采矿地质学等多学科综合作用的结果[9]-[11]。

断裂构造是重要的导水介质，其导水性受断层性质、充填物组成及应力状态等因素控制。压性断层所形成的致密带阻水能力强，而张性断层及次生裂隙网络常成为主要的导水通道。

地层原生结构对水害发生的危险性和规模具有重要影响。河流相砂岩因分选性好、胶结疏松等特点，具有良好的储水导水性能。古风化壳的存在使不整合面内富集大量地下水，形成重要的横向渗流通道。

顶底板岩性组合是控制突水的关键因素，致密的泥质隔水层能有效阻隔上覆地下水，而隔水层厚度和完整性直接影响其阻水效果。

2.3. 水害发生的动力学机制

矿井涌水灾害的动态演化遵循渗流力学、岩石力学及采矿工程学等学科基本规律，是多场耦合作用的复杂过程[12]-[14]。矿井水害形成机理分析流程如图1所示：

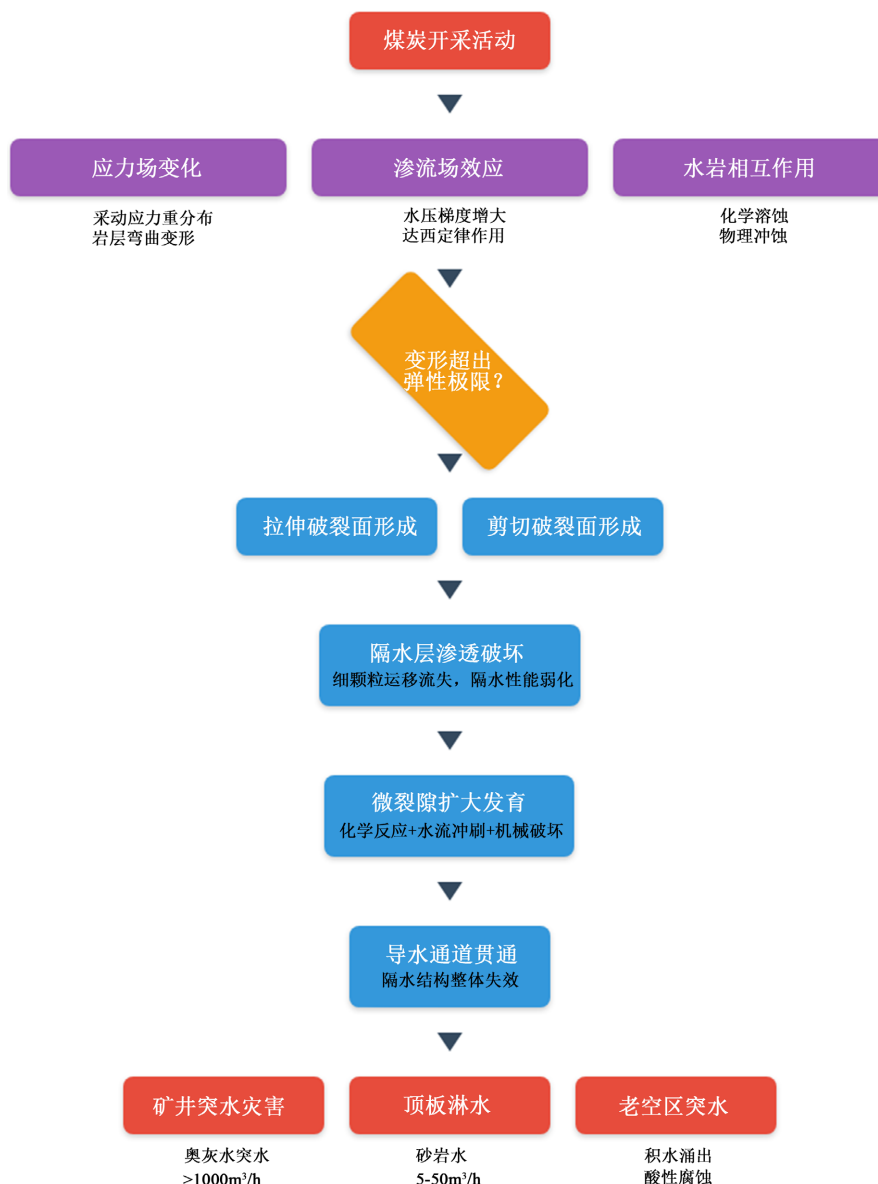


Figure 1. Flowchart of analysis of the formation mechanism of mine water hazards
图 1. 矿井水害形成机理分析流程图

应力场作用：煤炭开采引起的应力重分布是诱发矿井突水的根本动因。采动诱发的顶底板岩层产生弯曲变形，当变形超出岩体弹性极限时，形成拉伸或剪切破裂面，为突水创造了通道条件。

渗流场效应：根据达西定律，复杂地层条件下，随着隔水层厚度减小，其承受的水压梯度显著增大，当超过临界破坏梯度时，隔水层发生渗透破坏，引起细颗粒运移流失，进一步弱化其隔水性能。

水岩相互作用：这是化学溶蚀、物理冲蚀和机械破坏的耦合过程。含水介质中侵蚀性离子与隔水层易溶矿物发生化学反应，逐步扩大既有微裂隙，在水流冲刷作用下带走破碎残留物，最终导致隔水结构整体失效。

3. 煤矿水害防治关键技术

3.1. 水害探测与监测技术

矿井水害探测已形成以物理勘探、钻探验证和智能监测为核心的一体化探测体系[15]-[17]。煤矿水害防治技术总体流程如图 2 所示：

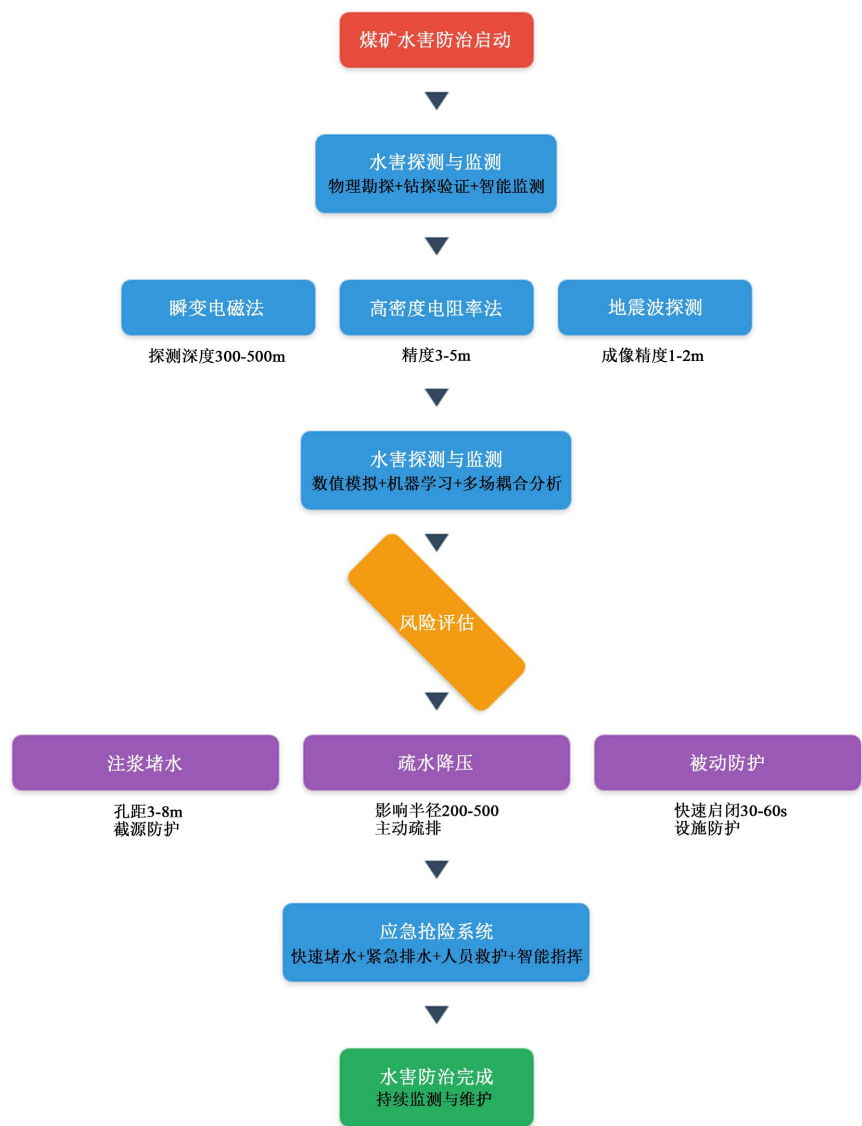


Figure 2. Overall flow chart of coal mine water hazard prevention technology
图 2. 煤矿水害防治技术总体流程图

物理勘探技术:

瞬变电磁法利用电磁场对含水体的响应特征进行探测,探测深度可达 300~500 m,水平分辨率 5~10 m,特别适用于大型含水构造和含水老空区的探查。

高密度电阻率法作为高精度电法勘探手段,能够获得 3~5 m 以下地层的高精度电性成像。

地震波探测基于弹性波在地层中的传播特征,成像精度可达 1~2 m,折射波法可实现含水层埋深和厚度的精确测定。

钻探验证技术:钻探是最直观的验证手段,通过抽水试验和压水试验等方法,定量评估地下水水力参数。定向钻探技术可对特定地质目标进行精准定位,钻孔间距控制在 50~100 m。

智能监测技术:集成现代传感、通信、数据处理等技术,采用分布式光纤传感技术,实现对温度、应变、渗流等多参量的实时监测。建立地下水位、水压、水质等参数的在线监控系统,为水害预警提供数据支撑。

3.2. 水害评价与预测技术

以多场耦合作用下的水害危险性评估为核心,构建考虑渗流场、应力场和损伤场的耦合数学模型,实现开采影响下水害演化的定量分析[18]。

数值模拟技术:

有限元方法能够精确模拟断层、节理等地质结构对渗透性的影响,数值模拟精度可达 1 m 乃至亚米级。

有限差分法具有高效的数值求解能力,适合大范围、长时序的动态模拟,时间步长可达分钟级,空间网格可达千万节点。

参数获取与边界条件:地下水渗流数值计算的关键是准确获取水文地质参数和边界条件。渗透率的时空变异性通过地统计学方法表征,变异函数的构建需要充分的现场实测数据支撑。

采动损伤模型:采用弹塑性损伤理论,建立能够反映岩石从弹性到塑性破坏全过程的本构模型,以指数或幂函数形式描述渗透率与损伤的演化关系,渗透率变化可达 2~3 个数量级。

机器学习预测方法:基于大数据特征的随机森林算法、适合小样本的支持向量机算法、具有非线性映射能力的神经网络等,实现水害预测精度 85%~90%。

3.3. 防治水工程技术

在此基础上,提出了“注浆堵水”、“疏水降压”和“被动防护”相结合的综合治理措施。以“止水”为主要措施的“止水”工艺,在“采空”与“采空”间构筑起“人造”的“隔水区”,“压水”的“压浆”是“压水”的关键,“压浆”是“压水”的重要组成部分,孔间距根据注浆体的扩散直径(通常为 3~8 m),压浆的最大厚度为 5~10 m,压浆的厚度要达到目的含水层和较低的加固层 5~10 m,采用多序钻孔技术,以增加注浆的密实度,序孔的间隔时间控制在 24~72 小时。疏水巷道采用疏水减压,通过对含水层中的地下水进行有效的调节,实现对其疏水性的有效抑制;采用多支水平井并眼可有效增大疏水区域,提高疏水区域 200~500 m。该项目是一种新型的主动保护方法,它包括了一种新的方法,它是一种新的方法,它可以让您在很短的一段时间里变得非常容易,而且它还可以在 30 到 60 秒钟的范围之内。它是一种由钢筋混凝土构成的建筑,它的厚度一般在 0.5 到 2.0 m 之间,它是一种能够按照水位监控信号来进行的智能控制系统。

3.4. 应急抢险技术

应急救援是建立快速堵水、排水、救人和智能指挥的一体化应急系统。该方法采用速凝物质对突水

区进行迅速堵塞，将其凝固速度控制在 3~10 min 以内，30 min 之内实现 5~10 Mpa 的初期强度；聚合物止水材料吸水后，体积增大 5~20 倍，对裂缝形态进行自适应，从而实现对裂缝的高效封闭；气袋堵水技术适合于大面积的突出巷道，其充胀后会产生很大的径向压强，多层堵水过程通过设置多道防线，提高堵水可靠性。在紧急情况下，紧急排水需要兼顾最大的流量与设施的配合，高功率潜水泵的泄流量可以达到 1000-5000 m³/h，水头可以达到 300~500 m 的提升需求，采用多层的泵站布局，可以达到接力排水的目的，而移动的排水装置可以方便地进行安装，在设计的时候，要兼顾水力损耗和管线的强度，管径的选择要遵循经济流速的原则，一般控制在 1.5~3.0 米/秒范围内。在人员疏散与营救中，要将“安全第一”的思想表现出来，要提前制订应急疏散计划，并且要经常进行演习，在地下避难硐室中，要给工作人员提供一个暂时的栖身之处，在这里，要有足够的氧气、食物、通信设备和医疗物资，可以保证 20~50 人 72 小时的基本需要，自救设备配置包括压缩氧自救器、隔离式自救器等。智慧应急调度系统集成成了监控、通讯、决策、执行等各个功能模块，实现了对监测数据的实时预警，并通过三维可视化的方式将设施分布、人员位置、流向等重要信息进行可视化展示，无人机与机器人等科技手段，实现了对高危地区的侦查与操作。

4. 技术应用案例分析

为验证上述煤矿水害防治关键技术的有效性和实用性，本研究选取了我国三个典型地质条件下的工程实例进行深入分析。华北型煤田以奥陶系灰岩裂隙型含水层为代表，具有高水压、大涌水量的特点，是我国煤矿突水灾害的主要威胁源；西北矿区以黄土高原覆盖下的砂岩含水层为典型，虽然单层厚度有限，但空间连续性好且距煤层较近，采动扰动易引发顶板突水；南方岩溶矿区地质条件最为复杂，岩溶发育极不均匀，地下水系统多层级分布，防治难度最大。通过对这三类具有代表性的水害防治工程实践的详细剖析，系统评价了“探 - 防 - 堵 - 截 - 排”综合防控理念的实施效果，验证了多技术协同应用的优势，为同类型矿井水害防治提供了宝贵的工程经验和技術参考。典型案例防治效果对比如图 3 所示：



Figure 3. Flowchart of comparison of prevention and control effects in typical cases
图 3. 典型案例防治效果对比流程图

4.1. 华北型煤田底板奥灰水害防治案例

奥陶系灰岩裂隙型含水层是华北煤田最大的突水隐患之一。某大型煤矿 3-1 煤层受奥灰水威胁，含水层埋深 380~420 m，厚度 180~220 m，静水位 15~25 m，单孔涌水量 300~800 m³/h，水化学类型为 HCO₃-Ca·Mg 型，矿化度 2~5 g/L。岩溶发育在时空上呈显著不均匀性，其发育程度与古地貌、构造背景密切相关。

勘探阶段：采用“探 - 防 - 堵 - 截 - 排”五位一体综合防控理念。勘探期采用高密度电阻率法、瞬变电磁法和地震反射法联合物探，完成 120 km² 面积、5 m × 5 m 网度的测量。累计完成钻探 15,000 m，获得 31 组抽水试验资料、45 组压水试验资料，采用三维地质建模技术，建立 1 m × 1 m × 1 m 精度的地层、构造及岩溶发育特征数字化模型。

防治措施：以底板加固注浆为主体工程，施工范围覆盖全工作面及外围 50 m 安全区。注浆孔按 6 m × 6 m 梅花形布置，注浆深度穿透奥陶系灰岩顶部 15~20 m。浆液配比为水灰比 1:1、水玻璃模数 2.4、密度 1.38~1.40 g/cm³ 的水泥 - 水玻璃双液浆。注浆过程中通过取芯、压水试验、声波测试等手段检验注浆质量，注浆合格率>95%。

设置奥灰疏水巷道，断面 12 m²，坡度 3‰，疏水钻孔按上向扇形布置，单孔疏水量 20~50 m³/h。监测结果显示，工作面区域奥灰水位下降 8~15 m，水压降低 0.8~1.5 MPa，底板突水系数从 0.8~1.2 MPa/m 降至 0.3~0.5 MPa/m。

治理效果：开采过程中未发生底板突水事故，最大涌水量仅 15 m³/h，远低于设计控制指标 80 m³/h，防治效果显著。

4.2. 西北矿区顶板砂岩水害治理案例

西北某矿区是黄土高原特殊地质条件下的典型代表。2-2 煤层上覆直罗组砂岩，厚度 15~25 m，埋深 200~250 m，孔隙率 12%~18%，渗透率 50~200 mD，岩性为中粗粒石英砂岩。地下水补给以大气降水和侧向径流为主，地下水流向由西南向东北，水力梯度 2‰~5‰。该类含水层厚度虽不大，但在空间上连续性好，且距煤层较近(8~12 m)，采动扰动易引起顶板冒落沟通含水层。

防治策略：根据该区降水稀少、蒸发强烈的气候特征，制定以疏水为主的综合控水方案。

分层疏水工艺：针对顶板砂岩含水层，采用“分层疏水”工艺，在煤层顶板施工疏水钻孔，将水引入地面蓄水池。钻孔规格 Φ110 mm，孔深 30~45 m，仰角 15°~25°，孔距 25~30 m。疏水管路选用 DN75 钢管，管口加装过滤器防止出砂堵塞。疏水系统设自控装置，根据水位高低自动启停水泵。

预裂爆破技术：预裂爆破能有效控制冒落带裂隙发育高度，采用不耦合装药结构，装药系数 0.3~0.4，孔距 2~3 m，单耗 200~300 g/m³。通过数值模拟优化确定距工作面 5~8 m 的预裂位置，裂缝贯通率>85%。预裂爆破后顶板破断面发育高度控制在 10~15 m 范围内，有效阻断了与上部含水层的水力联系。

胶结充填采矿：部分矿段采用废弃尾砂进行胶结充填开采。充填材料配比为粉煤灰：水泥：矸石 = 15:10:75，胶凝材料用量 25~30 kg/m³。充填体 28 d 抗压强度达 3~5 MPa，对顶板提供有效支撑，减少冒落带破坏。充填区顶板下沉量控制在 200~500 mm，导水裂隙发育明显减弱。

治理效果：采取综合治理后，工作面涌水量降至 3~8 m³/h，疏采结合基本满足矿井生产生活用水自给。

4.3. 南方岩溶矿区水害综合治理案例

该工程在我国南方某强岩溶发育区开展大规模水害防治实践，充分体现了多种技术手段在复杂环境下的协同作用。

地质背景：工程区位于桂北岩溶高原，以石炭系灰岩为主要开采对象，地表岩溶洞穴十分发育，形成众多落水洞、漏斗和峰林，地下暗河和溶洞系统极为复杂，属典型的岩溶地貌。区内主要为厚 300~500 m 纯质灰岩，其发育受地形地貌、水文气候及构造控制明显，具有垂向分层和横向分带的复合特征。地下水为多层级水文系统，浅层岩溶水与地表河流联系密切，深层承压水相对稳定。

综合勘探技术：以三维激光扫描、无人机摄影测量和探地雷达为基础，构建地表岩溶探测系统。完成 200 km² 岩溶地形调查，绘制 1:2000 岩溶地质地形图，识别 156 个大型落水洞、43 个岩溶洼地、23 个干谷。采用高分辨地震探测技术，对 2 m 以上洞穴能够有效识别，探测精度达 2 m，钻孔验证洞穴预报准确率达 78%，含洞率 5%~15%不等。

综合防治措施：采用“地表封堵、地下疏导、重点加固”的综合治理策略。地表防护措施包括落水洞封堵、截洪沟建设、排水涵管设置等，累计封堵 35 个大型落水洞，修建 12 条截洪沟。防渗体心墙厚 2~3

m, 渗透系数 $<10^{-6}$ cm/s, 防渗体为粘土心墙 + 块石组合护坡。

疏水巷道总长 3.2 km, 实施 87 个疏水钻孔, 累计进尺 15600 m, 定位精度 ± 1 m。巷道超前探测技术确保施工安全, TSP 地震超前探测范围 150~200 m, 对 >10 m 洞穴能够有效判别。红外热成像技术检测岩体表面温度场, 探测精度 1~2 m。发现异常及时进行超前钻孔验证, 根据具体情况采取注浆加固、改线绕避等措施。

治理效果: 综合治理后该矿涌水量从治理前的 8000 m³/h 降至 1200 m³/h, 水害事故发生率下降 85%。

5. 结论

矿井水害治理技术体系的建立与健全是多学科交叉与技术融合的系统工程, 其发展程度将决定着国家的安全与可持续发展。在对矿井水害类型、致灾机制、防治技术及工程实例进行了深入剖析后发现, 矿井水害成因复杂, 其成因与采动影响因素复杂, 各类型水害防治需有特定技术措施, 单一防治方式已很难应对复杂变化的地质环境。目前, 我国矿井突水灾害防控技术虽已发展成熟, 但在探测精细化、智能化预测、工程化治理等领域还存在很大差距, 物探方法的分辨力与可信度有待提高, 而多场耦合作用下的数值仿真研究虽然已有一定的发展, 但其预测结果的不确定性仍然是限制其准确性的主要原因。针对这一问题, 本项目提出了一种基于多学科交叉融合的新思路: (1) 针对含水层的注浆加固方法, (2) 针对不同类型(不同类型、不同类型的地下水, 采用不同类型的岩石, 采用不同的方法对不同类型的岩体进行不同的处理, (3) 不同类型(如不同类型、类型、类型等)。华北矿区的奥灰水害防治、西北矿区砂岩水害治理、南方岩溶矿区综合治理、老空区积水治理等工程实例的成功应用, 验证了所提出的防治方法的可行性与可行性, 对同类矿井水害防治具有重要的参考价值。从长远看, 矿井水害治理的发展将向智能化、精细化、绿色化方向发展, 随着人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的深入运用, 使矿井水害治理由被动防御向主动预防, 由定性分析向定量评价, 由单点治理向系统性控制的根本性转型, 为国家的安全生产建设奠定更为扎实的技术基础。

参考文献

- [1] 马峰峰. 煤层开采水害超前防治技术研究与应用[J]. 能源与节能, 2025(8): 253-255.
- [2] 杨延东. 煤矿水文地质勘探对矿井水害防治的作用[J]. 能源与节能, 2025(8): 95-98.
- [3] 闫校金. 三元煤业 4326 回采工作面底板水害防治技术研究[J]. 煤, 2025, 34(8): 44-47.
- [4] 褚向武. 哈麻冲煤矿一采区水害影响分析及防治水措施[J]. 江西煤炭科技, 2025(3): 132-135.
- [5] 康军, 杨冬冬, 康权, 陈龙, 尤建平, 陈果. 煤矿井下无线随钻测量系统研究现状与展望[J]. 煤炭技术, 2025, 44(8): 228-232.
- [6] 徐虎, 王明波, 陈刚. 神府煤田煤矿老空水害防治技术与应用[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(8): 134-139.
- [7] 王建军, 吴继蛟. 煤矿水文地质条件分析及矿井水害防治技术研究[J]. 能源与节能, 2025(7): 136-138.
- [8] 汪旭. 煤矿水文地质特征与水害成因分析及防治策略探讨[J]. 能源与节能, 2025(7): 292-294+298.
- [9] 范创. 煤矿掘进巷道水害防治技术探讨[J]. 价值工程, 2025, 44(21): 152-154.
- [10] 王刘星. 离层水害超前地质预报模型与应用[J]. 煤炭工程, 2025, 57(7): 165-170.
- [11] 段红飞, 李泽鹏, 高辉, 李智勇, 王旭锋, 段晓鹏. 小纪汗煤矿小煤柱工作面覆岩采动裂隙发育特征及防治水研究[J]. 煤炭工程, 2025, 57(7): 102-109.
- [12] 王成. 煤矿工作面充水原因分析及底板水害防治技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(13): 25-27.
- [13] 王宇, 闫圆圆, 闫国成. 电法电磁法联合解释在工作面水害防治中的应用[J]. 煤矿现代化, 2025, 34(5): 44-48.
- [14] 张克聪, 胡士勋, 蒙超, 路东东, 刘广兴, 张波. 煤矿回采工作面“裂隙场-应力场-渗流场”演化规律研究[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(7): 26-32.

-
- [15] 孙继平, 龚大立. 煤矿瓦斯抽采和探水作业智能管理系统标准研究制定[J]. 工矿自动化, 2025, 51(6): 1-7.
- [16] Chengshuai, L., Han, L., Zhanli, Z., Qingyang, Z., Qianqian, D., Teng, Z., *et al.* (2024) Research on the Application of Transient Electromagnetic Exploration in Coal Mine Water Disaster Prevention and Control. *Journal of Physics: Conference Series*, **2895**, Article 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2895/1/012054>
- [17] Lu, C., Li, P., Xu, J. and Chai, J. (2024) Knowledge Map Analysis of Coal Mine Water Disaster Prevention and Control in China from 2000 to 2023. *Earth Science Informatics*, **17**, 2791-2799. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01353-z>
- [18] Shi, X. and Zhang, W. (2023) Characteristics of an Underground Stope Channel Supplied by Atmospheric Precipitation and Its Water Disaster Prevention in the Karst Mining Areas of Guizhou. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 15892. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43209-4>